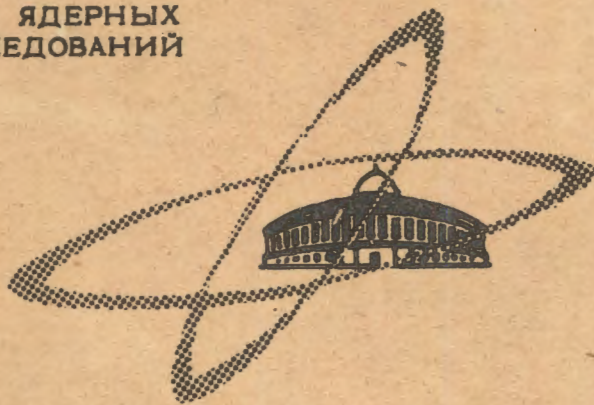


A-64

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.



13 - 4395

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

В.Д.Ананьев, Д.И.Блохинцев, Б.Н.Бунин,
Л.К.Кулькин, И.М.Матора, В.М.Назаров, В.Т.Руденко,
И.М.Франк, Е.П.Шабалин, Ф.Л.Шапиро, Ю.С.Язвический

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ
И РАЗВИТИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ
РЕАКТОРОВ В ДУБНЕ

1969

Представлено на симпозиум по
импульсным реакторам в Альбукерке,
США, 28-30 января 1969 г.

13 - 4395

7812/4 up

В.Д.Ананьев, Д.И.Блохинцев, Б.Н.Бунин,
Л.К.Кулькин, И.М.Матора, В.М.Назаров, В.Т.Руденко,
И.М.Франк, Е.П.Шабалин, Ф.Л.Шапиро, Ю.С.Язвицкий

**ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ
И РАЗВИТИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ
РЕАКТОРОВ В ДУБНЕ**

Представлено на симпозиум по
импульсным реакторам в Альбукерке,
США, 28-30 января 1969 г.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Импульсный реактор на быстрых нейтронах периодического действия (ИБР) был построен в 1958-1959 гг. и пущен в эксплуатацию в июле 1960 г. С тех пор он проработал 25000 часов; выработанная энергия составила 65000 квт/часов. Исчерпывающее описание теории ИБРа и его конструкции дано в работах /1,2,3,4/.

За время продолжительной кампании реактора накоплен достаточный материал, позволяющий сделать положительные выводы относительно надежности, устойчивости в работе и целесообразности применения импульсного реактора периодического действия для широкого класса физических исследований. В процессе эксплуатации установки ряд узлов и сам реактор в целом претерпели значительные изменения, связанные с их усовершенствованием - обеспечением более надежной работы и улучшением физических характеристик установки /5,6,7,8/.

Успешный опыт работы ИБРа позволил приступить к созданию ИБР-30 - усовершенствованного, более мощного аналога ИБРа, а также представителя следующего поколения импульсных реакторов периодического действия - ИБР-2. Проект этого 4 - мегаваттного реактора с жидкометаллическим охлаждением разрабатывается ОИЯИ совместно с проектными организациями Советского Союза.

§1. Опыт эксплуатации и усовершенствование реактора ИБР

Отличительная особенность импульсного реактора периодического действия - устройство для создания пульсации реактивности. Для ИБРа это два диска с урановыми вкладышами, двигатель постоянного тока и система передачи вращения от двигателя к дискам. За все время работы были зарегистрированы следующие неисправности механической части:

а) Разрушение одного из опорных подшипников главного диска; это вызвало перекося вала, однако повреждений тепловыделяющих элементов не было.

Теперь в реакторе используются более высококачественные подшипники и установлен второй страхующий комплект подшипников, ограничивающих перекося вала в случае повреждения рабочего комплекта.

б) Разрушение подшипника и деталей передачи вспомогательного диска, обусловленное радиационной полимеризацией консистентной смазки; в связи с этим консистентная смазка была заменена проточной.

в) Износ зубьев муфты, соединяющей валы редуктора и главного диска, вызванный крутильными колебаниями в системе. Между валами была поставлена муфта с резиновыми прокладками, гасящая колебания.

г) Наибольшее внимания потребовало стальное покрытие основного уранового вкладыша, которое уже вскоре после пуска реактора обнаружило тенденцию к выпучиванию. Этот факт был неприятен из-за того, что зазор между неподвижной активной зоной и поверхностью диска составлял всего 1,7 мм. Для контроля за состоянием покрытия были введены емкостные датчики, регистрирующие форму профиля покрытия во время вращения диска. К лету 1963 г. выпучивание составило 0,6 мм над поверхностью диска; для увеличения безопасности работы была снижена скорость вращения диска с 5000 об/мин до 3000 об/мин и увеличен зазор между диском и активной зоной.

В конце 1963 г. диск с урановым вкладышем был заменен новым с толщиной покрытия, увеличенной от 0,4 до 0,6 мм. При исследовании отработавшего уранового вкладыша не было обнаружено каких-либо изменений его формы. Проведенный позднее анализ условий работы вкладыша и эксперименты на моделях позволили установить, что выпучивание покрытия обуславливается действием температурных напряжений в оболочке вкладыша и усугубляется наличием центробежных сил. Мы надеемся, что введенные на основании этих данных изменения в конструкции оболочек позволят существенно увеличить безопасную тепловую нагрузку на вкладыши ИБР-30.

Вспомогательный подвижный вкладыш, служащий для изменения частоты повторения импульсов, определяет величину побочных импульсов мощности ("сателлитов"), которые имеют место при прохождении основного вкладыша через активную зону, если вспомогательный вкладыш - вне зоны. Опыт физических исследований на реакторе показал, что наличие сателлитов в ряде случаев затрудняет обработку экспериментальных данных. Для уменьшения амплитуды побочных импульсов проектный вспомогательный вкладыш был заменен новым, более тяжелым, с эффективностью около 1%. Много неудобств в процессе эксплуатации доставляла смена редукторов и проведение синхронизации главного и вспомогательного дисков вручную при переходе с одной частоты повторения импульсов на другую. В 1965 г. введена в действие электромеханическая система, позволяющая дистанционно переключать редуктор на другую передачу с сохранением синхронности вращения основного и вспомогательного дисков.

В 1964 г. была проведена реконструкция системы охлаждения реактора: увеличен расход воздуха на тепловыделяющие элементы до $170 \text{ м}^3/\text{час}$, введено принудительное охлаждение стержней аварийной защиты. Эти меры позволили поднять среднюю мощность реактора сна-

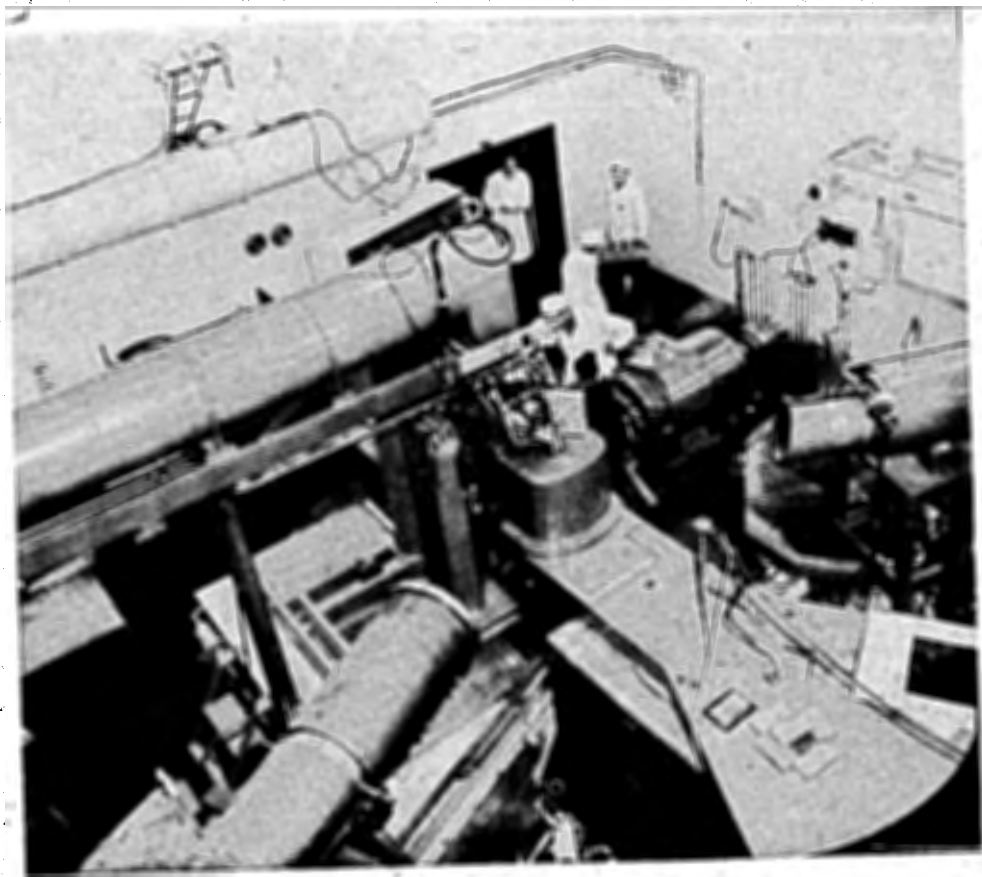


Рис.1. Общий вид зала реактора.

чала до 3 квт, а затем и до 6 квт. Измеренная температура оболочек тепловыделяющих стержней на мощности 6 квт составляет 180°C . Температура оболочки уранового вкладыша и диска вблизи вкладыша была измерена с помощью термочувствительных красок; по данным этих измерений температура урана в центре вкладыша оценивается в $190+260^{\circ}\text{C}$.

В 1966 г. из-за продолжавшегося выпучивания покрытия уранового вкладыша рабочая мощность реактора была снижена до 3 квт. На этой мощности реактор успешно проработал до лета 1968 г., когда он был остановлен для замены его новым реактором - ИБР-30, краткое описание которого дается ниже.

Первоначально кинематическая схема реактора позволяла работать при частоте повторения импульсов мощности 5, 10, 25 и 50 сек^{-1} (при скорости вращения диска 3000 об/мин). Однако ряд усовершенствований механической части дал возможность осуществить другие режимы пульсации реактивности. Для некоторых физических экспериментов желательно увеличение амплитуды импульсов мощности, т.е. уменьшение частоты импульсов при неизменной средней мощности. Это относится, во-первых, к экспериментам с очень медленными нейтронами (большое пролетное время от источника к детектору), во-вторых, к тем случаям, когда интенсивность фона пропорциональна времени работы анализатора (т.е. фон, в основном, не реакторного происхождения). В последнем случае уменьшение частоты позволяет получить лучшее отношение "эффекта" к "фону".

В 1966 г. на ИБРе был осуществлен режим, когда формировались "пакеты" импульсов, следующие с частотой $1/8 \text{ гц}$, а период импульсов внутри "пакета" определялся частотой вращения ОПЗ (основной подвижной зоны) - $1/50 \text{ секунды}$. Характер изменения импульсов во времени показан на рис. 2.

Режим редких импульсов с постоянной амплитудой был осуществлен летом 1968 г. Частота следования была равна 1 импульсу за 5 секунд;

энергия одного импульса мощности составляла 10^{15} делений, что соответствует среднему подогреву тепловыделяющих элементов реактора на 10°C . Значение мощности в максимуме составляло 700 Мвт. Весьма

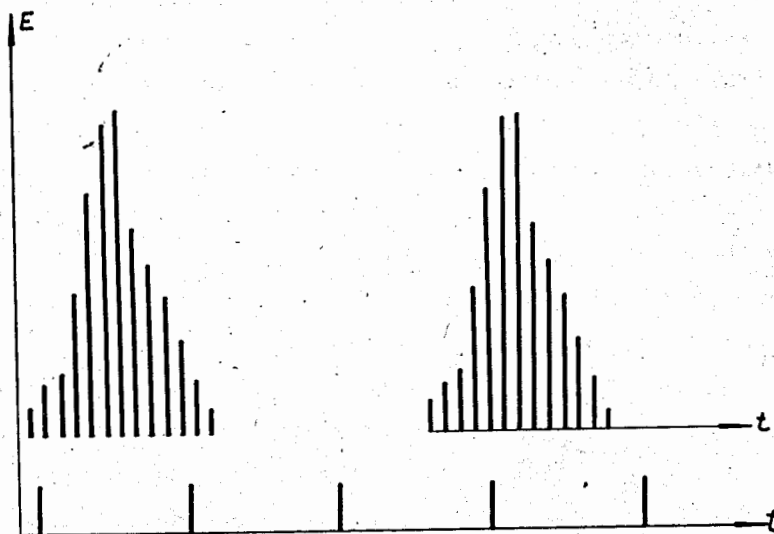


Рис.2. Характер изменения энергии импульсов реактора ИБР во времени в режиме импульсов переменной амплитуды.

неожиданным оказался факт значительного сокращения длительности импульса быстрых нейтронов в этом режиме. При частоте импульсов 5 сек^{-1} и той же средней мощности 6 квт измеренное значение полуширины импульса составило 56 мксек, а в режиме редких импульсов - 36 мксек (рис. 3). Детектором нейтронов в измерениях формы импульса служила установленная в 6 м от активной зоны ториевая камера деления, импульсы с которой через электронно-усилительную схему подавались на временной анализатор с промежуточной памятью 1 мксек. Наб-

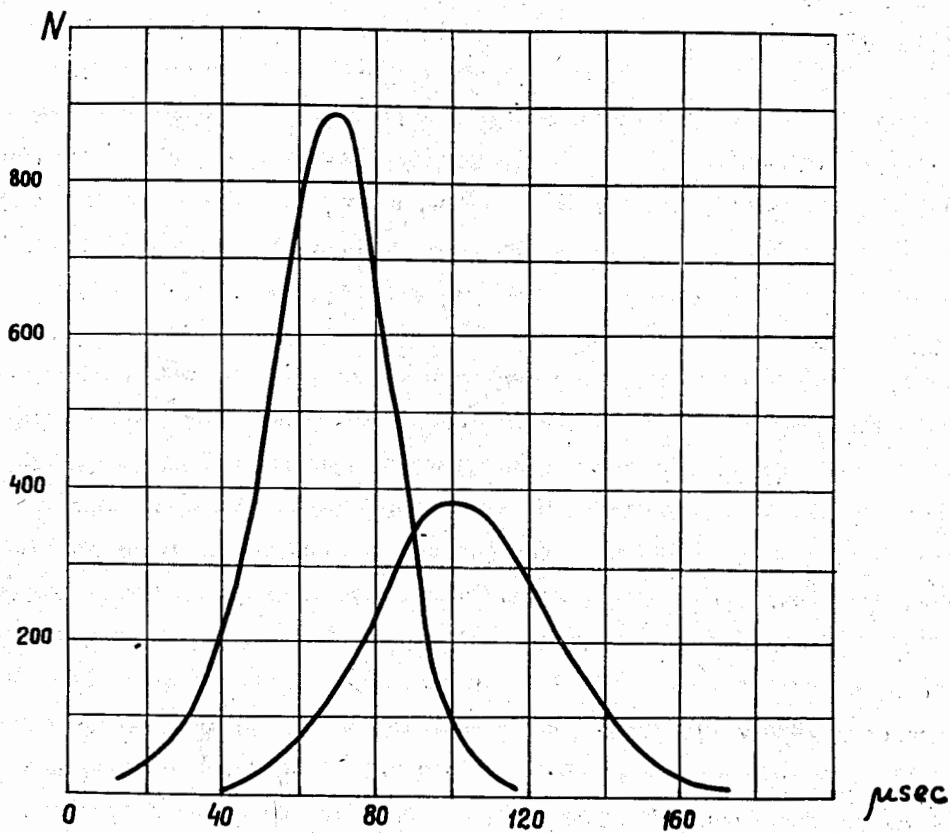


Рис.3. Форма импульсов мощности реактора ИБР при частоте повторения 5 и 0,2 сек⁻¹.

людаемые сокращение длительности и сдвиг положения максимума импульса свидетельствуют о наличии механизма мощного отрицательного эффекта реактивности во время импульса, значение которого оценивается в 10^{-3} абс.ед. реактивности. С помощью тензочувствительных датчиков регистрировались нестационарные процессы в стальной оболочке тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ'а) во время и после импульса. Тензодатчики были наклеены на поверхность оболочки стержня, находившегося на расстоянии 4,3 см от центра реактора, в двух точках его медианной плоскости - наиболее удаленной от центра (№1) и под углом 90° к ней (№2). ТВЭЛ крепился в нижней своей части, в то время как верхний его конец был свободен. Частота продольных колебаний оболочки (отрицательное значение ординаты на рис. 4-7 соответствует удлинению оболочки) составила ≈ 8000 гц при наибольшей амплитуде $3 \cdot 10^{-3}$ мм, что довольно хорошо согласуется с расчетными значениями, полученными по методике Randles /9/. Наблюдаемое запаздывание максимума удлинения оболочки по отношению к импульсу мощности соответствует теоретически предсказываемому. На основании измерений можно сделать весьма определенный вывод, что тепловое расширение плутония не обеспечивает указанного выше динамического эффекта реактивности. Сжатие оболочки (положительная ордината на рис. 5,7) в момент импульса, зарегистрированное на датчике №1, видимо, обусловлено изгибом ТВЭЛ'а вследствие неравномерности тепловыделения в поперечном сечении сердечника. Возможно, что изгиб твэла и является причиной отрицательного скачка реактивности; однако проведенный анализ из-за недостатка экспериментальных данных не позволяет пока однозначно описать реальную картину динамики ТВЭЛ'а и кинетики реактора в момент теплового удара. В связи с тем, что экспериментально обнаруженные эффекты оказывают влияние на физические характеристики импульсных реакторов, их безопасность, устойчивость работы и живучесть ТВЭЛ'а будут проведены дополнительные исследования на реакторе ИБР-30.

Detector N1

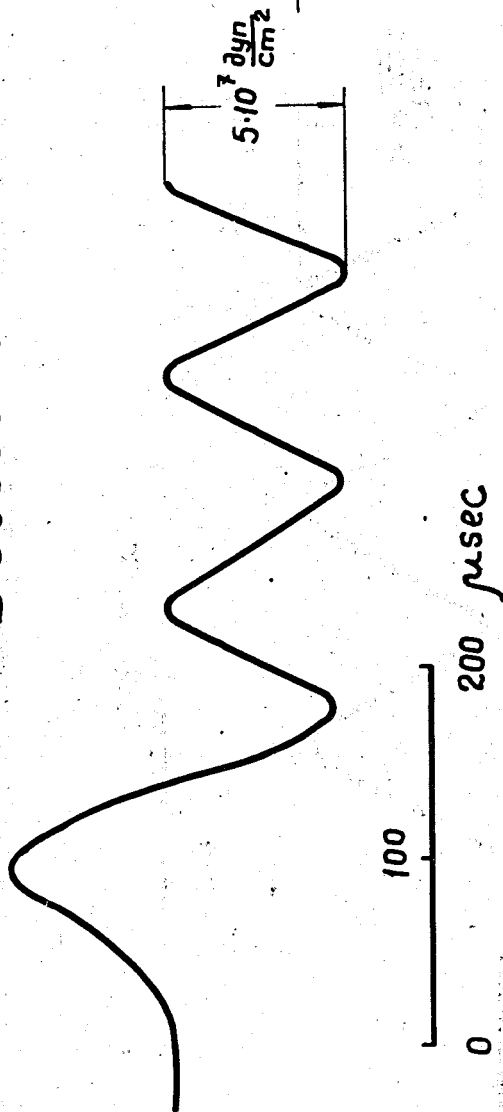


Рис.4. Колебания стальной оболочки ТВЭЛ'а в режиме редких импульсов; детектор №1.

Detector №2

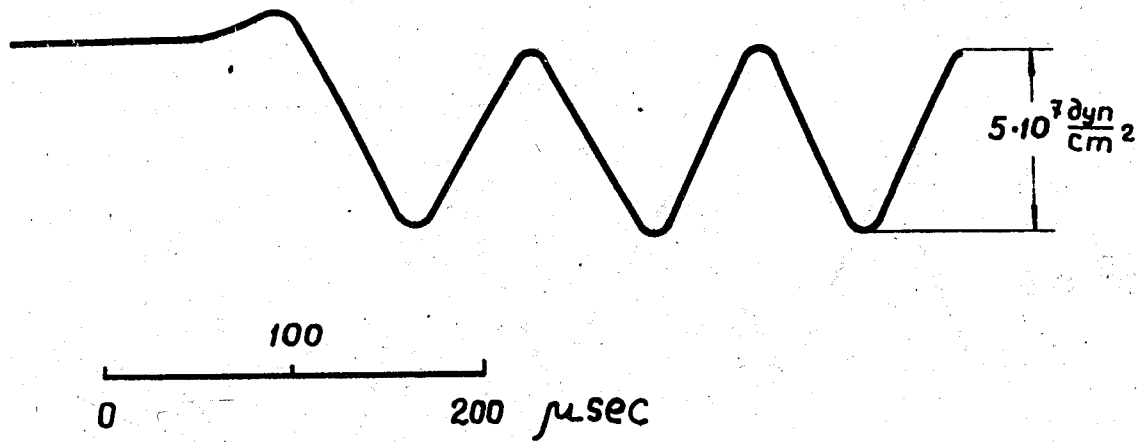


Рис.5. Колебания стальной оболочки ТВЭЛ'а в режиме редких импульсов; детектор №2.

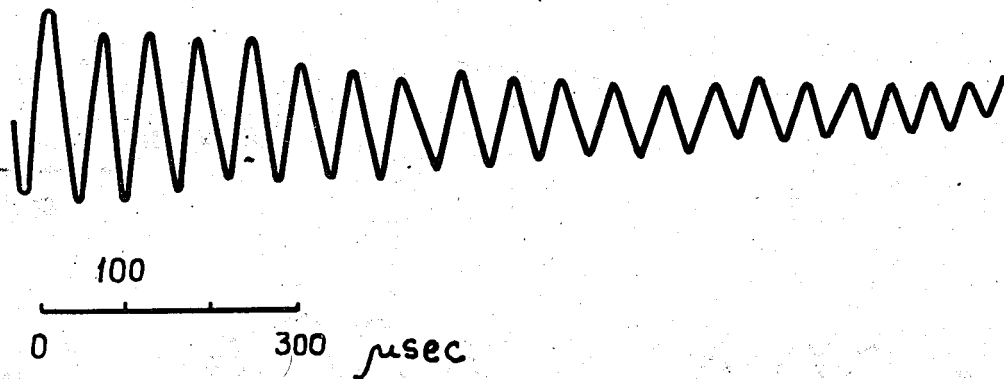


Рис.6. Характер затухания продольных колебаний оболочки ТВЭЛ'а.

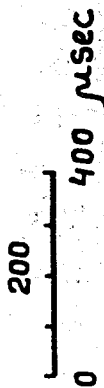
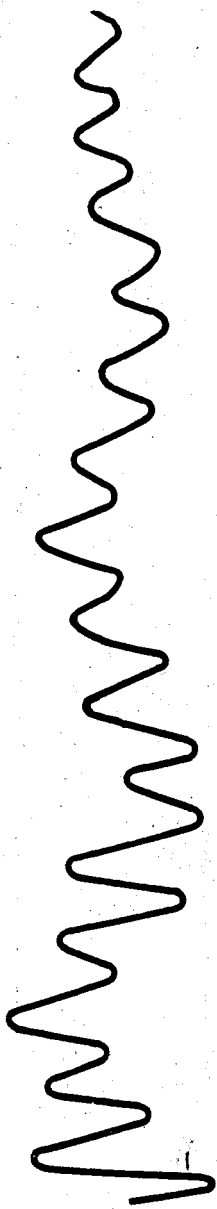


Рис.7. Характер затухания поперечных колебаний оболочки ТВЭЛ'а.

Первая проверка возможности умножения в 100-200 раз короткой вспышки нейтронов, генерированной в центре активной зоны ИБРа импульсом электронов от микротрона, была сделана в начале 1965 г. /8/. С тех пор дальнейшая работа ИБРа происходила попеременно в бустерном и реакторном режимах. Время, когда микротрон не работал на ИБР, использовалось для его интенсивного исследования и совершенствования. Всего система "ИБР + микротрон" проработала на эксперимент около 3000 часов; параметры этой системы приведены в таблице 1 /10,11,12/.

Таблица 1
Характеристики инжекторов и бустеров ЛНФ

Параметр	ИБР с микротроном	ИБР-30 с ЛУЭ-40
Энергия инжектируемых в мишень электронов	24-30 Мэв	44 Мэв
Ток электронов на мишень в импульсе	60-80 ма	180 ма
Длительность импульса электронов	1,7-1,9 мксек	1,8 мксек
Частота повторения импульсов	50 сек ⁻¹	100 сек ⁻¹
Средняя мощность бустера при полуширине вспышки нейтронов 3 мксек	1-1,2 квт	20-30 квт
Длительность непрерывного цикла работы	100-200 час	

Предельная мощность системы в бустерном режиме была достигнута не только увеличением тока электронов, но также с помощью увеличения диаметра урановой мишени с 10 мм, как это было вначале, до 15 мм, что составляет 3 диаметра пучка. Последнее привело к тому, что выход нейтронов с мишени достиг своего предельного значения $1,5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{нейт.}}{\text{эл.}}$ при энергии электронов 30 Мэв. Длительная работа с микротроном показала, что вряд ли можно ожидать увеличения в нем тока ускоренных электронов свыше 100 ма в импульсе. В связи с этим было принято решение демонтировать микротрон и воспользоваться для инъекции электронов в ИБР-30 разработанным к настоящему времени линейным ускорителем ЛУЭ-40.

Линейный ускоритель будет установлен вертикально в реконструированном зале над реактором. Параметры ускорителя и бустера с ЛУЭ-40 даются в таблице 1.

Большое внимание обращено на мишень линейного ускорителя, от которой зависит эффективность преобразования электронов в нейтроны. Проведенные теплофизические расчеты и эксперименты на электронном пучке микротрона позволили выбрать оптимальную конструкцию мишени для условий ее работы в активной зоне ИБР-30. В качестве материала мишени планируется использование тугоплавких соединений плутония. Мишень будет охлаждаться газообразным гелием низкого давления. Ожидаемая максимальная температура оболочки мишени около 800°C . Данные пучка ЛУЭ-40 как раз позволяют использовать ИБР-30 в бустерном режиме почти на предельной мощности. В реакторе ИБР-30, в основном, повторяются принципиальные конструктивные решения ИБРа. Однако, для работы на средней мощности 20 + 30 квт и обеспечения удобной эксплуатации реактора в более трудной радиационной обстановке конструкция сильно отлична в деталях. Увеличение теплосъема с активной зоны достигнуто уменьшением диаметра ТВЭЛов и увеличением расхода воздуха

до $300 \text{ м}^3/\text{час}$. Мощность, выделяемая в подвижной зоне, будет распределяться поровну между двумя вкладышами из U-235. Кинематическая схема реактора позволит осуществить работу практически с любой частотой повторения импульсов - от 100 сек^{-1} до одиночных импульсов с энергией 10^{16} дел. Нормальная попеременная работа двух урановых вкладышей возможна лишь в том случае, когда их эффективности отличаются не более, чем на 10^{-5} ед.реак.; в противном случае во вкладышах выделяется не равная мощность. Изготовление вкладышей с необходимой точностью практически невозможно; вследствие этого предусмотрены меры для физической балансировки вкладышей.

Учитывая неудачное конструктивное решение крепления активной зоны на кожухе диска в ИБРе, на ИБР-30 предусмотрена возможность смены механической части реактора без разборки активной зоны.

Основные характеристики ИБР-30 представлены в таблице 2. Пуск реактора намечен на 2-й квартал 1969 года.

Таблица 2
Характеристики реактора ИБР-30

Средняя тепловая мощность	30 кВт
Мощность в импульсе при частоте 5 сек^{-1}	150 Мвт
Количество делений на импульс	до 10^{16} дел.
Полуширина импульса мощности при частоте 5 сек^{-1}	50 мксек
Эффективное время жизни нейтронов деления	10^{-8} сек
Объем активной зоны	3 л
Поток быстрых нейтронов в активной зоне, средний во времени	$10^{13} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
То же, в максимуме импульса	$5 \cdot 10^{16} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
Утечка тепловых нейтронов с поверхности замедлителя (средняя во времени)	$6 \cdot 10^{10} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
Полуширина импульса тепловых нейтронов	90 мксек

Физические исследования, выполненные на базе реактора ИБР и системы ИБР-микротрон, относятся к следующим 4-м направлениям:

1. Изучение нейтрона как элементарной частицы; оценка поляризуемости нейтрона в электрическом поле ядра ^{13/}; новый метод измерения взаимодействия нейтрон-электрон ^{14/}; первое наблюдение ультрахолодных нейтронов (скорость 5 м/сек), открывающих перспективу существенного повышения точности измерения распада нейтрона и его электрического дипольного момента ^{15/}.

2. Ядерная физика, в особенности исследования нейтронных резонансов: разработка способа поляризации нейтронов с энергией $1-10^4$ эв ^{16/}; применения поляризованных нейтронов и поляризованных ядерных мишеней для решения актуального вопроса о спиновой зависимости рассеяния нейтрон-дейтрон ^{17/} и определения спинов нейтронных резонансов гольмия ^{18/}; исследования α -распада возбужденных состояний ядер, проявляющихся в виде нейтронных резонансов ^{19,20/}; изучение характеристик нейтронных резонансов большого числа ядер, в том числе делящихся ^{21/}, и т.д.

3. Задачи, важные для ядерной энергетики: измерение нейтронных спектров, образующихся при распространении нейтронов деления в средах ^{22/}; сечения захвата и деления и их отношение для важнейших делящихся ядер в широкой области энергий ^{23/}; исследования эффекта Доплера в уране в области промежуточных энергий нейтронов и т.д.

4. Физика конденсированных сред, развитие метода изучения дифракции нейтронов по времени пролета, позволившего получить разрешение, лучше достигнутого на стационарных реакторах ^{24/}; применение этого

метода для изучения дифракции нейтронов в магнетиках при больших магнитных полях (такие поля могут генерироваться только в виде редких импульсов и дифракционные измерения с ними практически невозможны на стационарных реакторах); изучение атомной динамики жидкостей, кристаллов, примесей в кристаллах, критического состояния жидкостей и магнетиков методом квазиупругого и неупругого рассеяния нейтронов /25,26,27,28/ и т.д.

В указанных направлениях получен целый ряд результатов, являющихся либо совершенно новыми, либо существенно более точными по сравнению с известными ранее данными. В значительной мере возможность проведения этих исследований обусловлена преимуществом реактора-ИБР как источника нейтронов для нейтронной спектрометрии.

§2. ИБР-2

ИБР-2 проектируется как многоцелевая установка, на которой могут базироваться ядерные исследования, исследования конденсированных сред методами нейтронной физики, а также прикладные работы, связанные, например, с изучением импульсных радиационных воздействий.

Установка включает в себя импульсный реактор на быстрых нейтронах периодического действия с жидкометаллическим охлаждением, сильноточный линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ-30 и экспериментальные устройства (рис. 8). Работа установки возможна в двух вариантах:

а) пучок электронов от ускорителя направляется на мишень, помещенную в центр активной зоны подкритического пульсирующего реактора - бустерный режим;

б) реактор используется без инжектора в импульсном режиме.

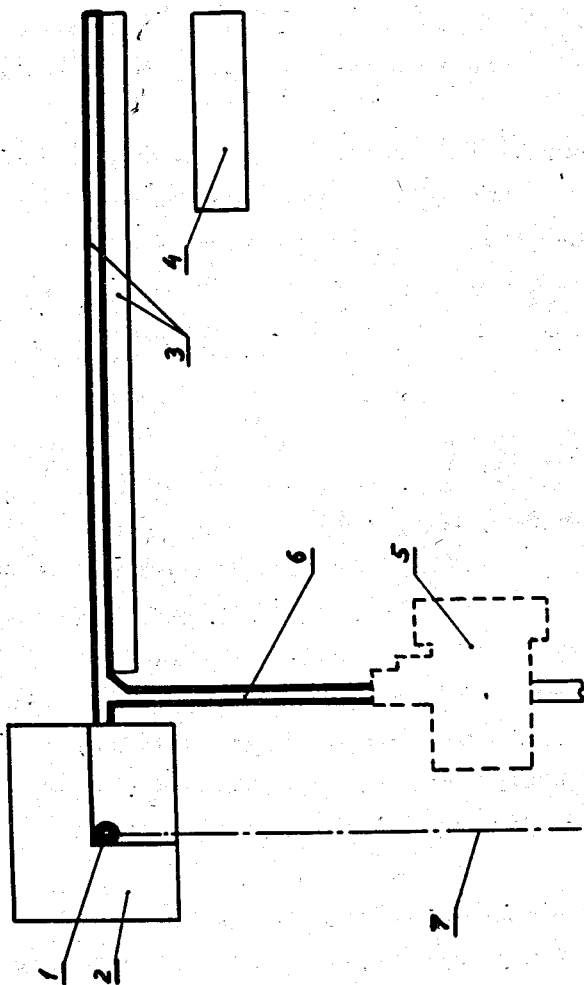


Рис.8. Схема размещения комплекса ИБР-2. 1 - реактор; 2 - здание реактора с экспериментальным залом; 3 - корпус индукционного ускорителя; 4 - здание измерительного центра; 5 - здание действующего реактора ИБР; 6 - галерея 100-метрового нейтронного ИБР; 7 - 1000-метровый нейтронвод ИБР-2.

Реактор

ИБР-2 - реактор на быстрых нейтронах с компактной активной зоной из ^{239}Pu (в форме двуокиси плутония) типа испытанной в эксплуатации зоны стационарного реактора БР-5^{/29,30/}. Импульсное действие реактора обеспечивается за счет периодического изменения реактивности системы путем перемещения части отражателя по отношению к активной зоне.

Активная зона реактора представляет собой неправильный шестигранник, набранный из кассет типа кассет реактора БР-5 с шагом 27 мм (рис. 9). Кассеты вставлены с натягом в нижнюю опорную стальную плиту. В каждой кассете по 7 твэлов; твэлы закреплены на двух концах и дистанционированы проволокой диаметром 0,5 мм. Высота активной части твэла составляет 40 см. В активной зоне располагается 71 рабочая кассета. Перегрузка кассет осуществляется без нарушения герметичности корпуса реактора; отработавшие кассеты перед выгрузкой расхлаживаются в среде натрия в пространстве над активной зоной. 7 центральных ячеек зоны занимает канал, нижняя часть которого используется для размещения мишени линейного ускорителя, верхняя - для облучения образцов. Мишень располагается на половине высоты активной зоны. В качестве материала мишени на первом этапе выбран вольфрам, охлаждаемый независимым натриевым контуром.

Активная зона размещается в двухстенном стальном корпусе: пространство между стенами является контрольным на протекание натрия и служит для подачи горячего воздуха при разогреве аппарата. Боковые стороны шестигранника защищены вольфрамовыми блоками толщиной 80 мм, выполняющими роль органов регулирования. Вольфрамовые блоки охлаждаются воздухом. К наибольшей стороне шестигранника примыкают основной подвижный отражатель и дополнительный подвижный отражатель, расположенные соосно. Роторы подвижных отражателей имеют

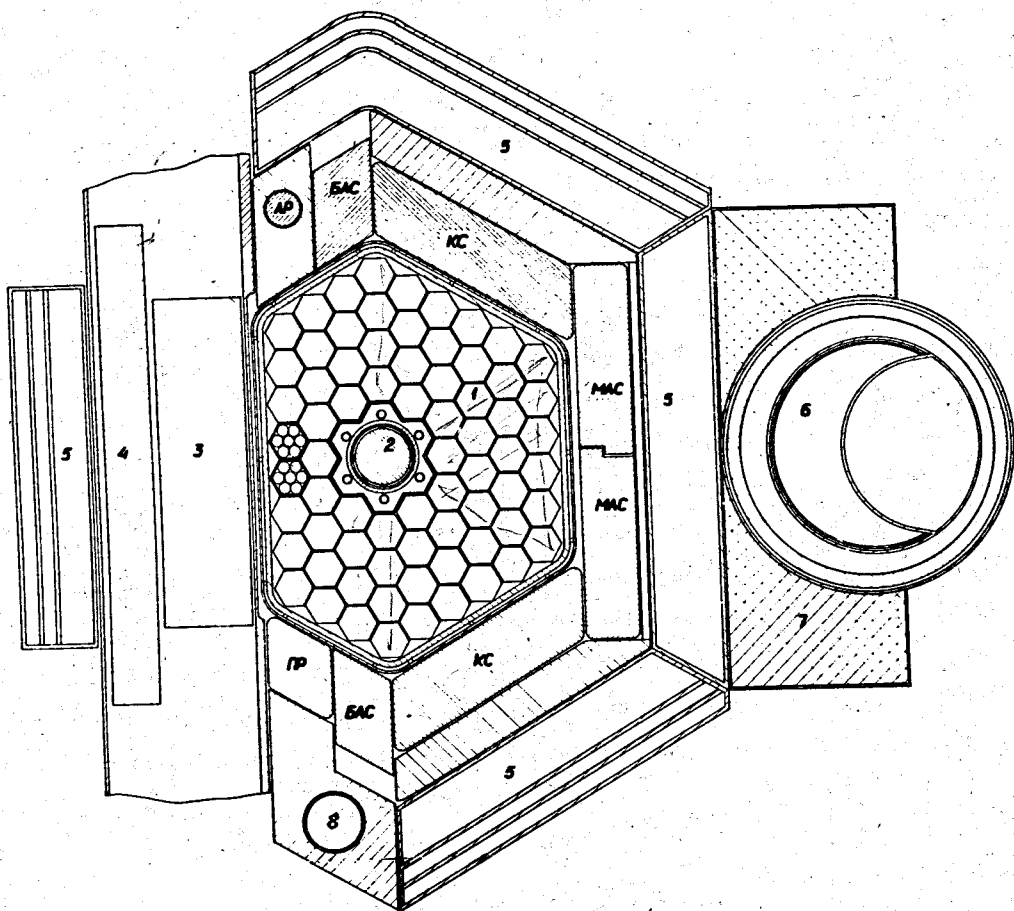


Рис.9. Схема активной зоны реактора. 1 - пакет тепловыделяющих элементов; 2 - мишень ускорителя; 3 - основной подвижный отражатель; 4 - дополнительный подвижный отражатель; 5 - секционированные водяные замедлители; 6 - "холодный" замедлитель; 7 - отражатель "холодного" замедлителя; 8 - канал пневмопочты в отражателе; БАС - стержни быстродействующей аварийной защиты; МАС - стержни медленной аварийной защиты; КС - компенсирующие стержни; ПР - промежуточный регулятор; АР - автоматический регулятор.

три трапецеидальных выступа, один из которых - собственно отражатель, а два других служат для баланса. Радиус подвижного отражателя 120 см, толщина основного отражателя 6,5 см (рис. 9 и 10). Ротор подвижного отражателя приводится во вращение со скоростью 3000 об/мин. электродвигателем переменного тока. Вращение дополнительного отражателя происходит от того же двигателя через редуктор с переменным передаточным отношением. Вместе с тем случаем, когда дополнительный отражатель не вращается, получается 4 возможных частоты следования импульсов реактора - 50, 25, 10, 5 импульсов/сек. Роторы подвижных отражателей вместе с двигателем и редуктором заключены в тонкостенный герметичный кожух, заполненный гелием.

В принятой схеме расположения регуляторов регуляторы КС-1 и КС-2 предназначены для компенсации выгорания ^{239}Pu и температурного эффекта реактивности, а промежуточный регулятор ПР - для плавного изменения реактивности при пуске реактора. Автоматический регулятор (АР) перемещается приводом от шагового двигателя, обладающего малой инерционностью. Безопасность реактора обеспечивается четырьмя блоками аварийной защиты, общей эффективностью 3,2%, из которых два (БАЗ) приводятся в действие гидравлической машиной поступательного действия. Срабатывание быстродействующей аварийной защиты (эффективность БАЗ 0,4%) происходит между импульсами мощности за время 0,02 сек. Вывод медленнодействующей аварийной защиты (МАЗ) осуществляется под действием собственной тяжести при отключении электромагнитов.

Система охлаждения активной зоны ИБР-2 в принципе сходна с системой стационарного реактора БР-5, которая доказала свою надежность в течение длительной эксплуатации. Схема охлаждения - трехконтурная двухпетлевая. В первом и втором контурах теплоносителем является жидкий натрий, в третьем - воздух. Двухпетлевая схема принята

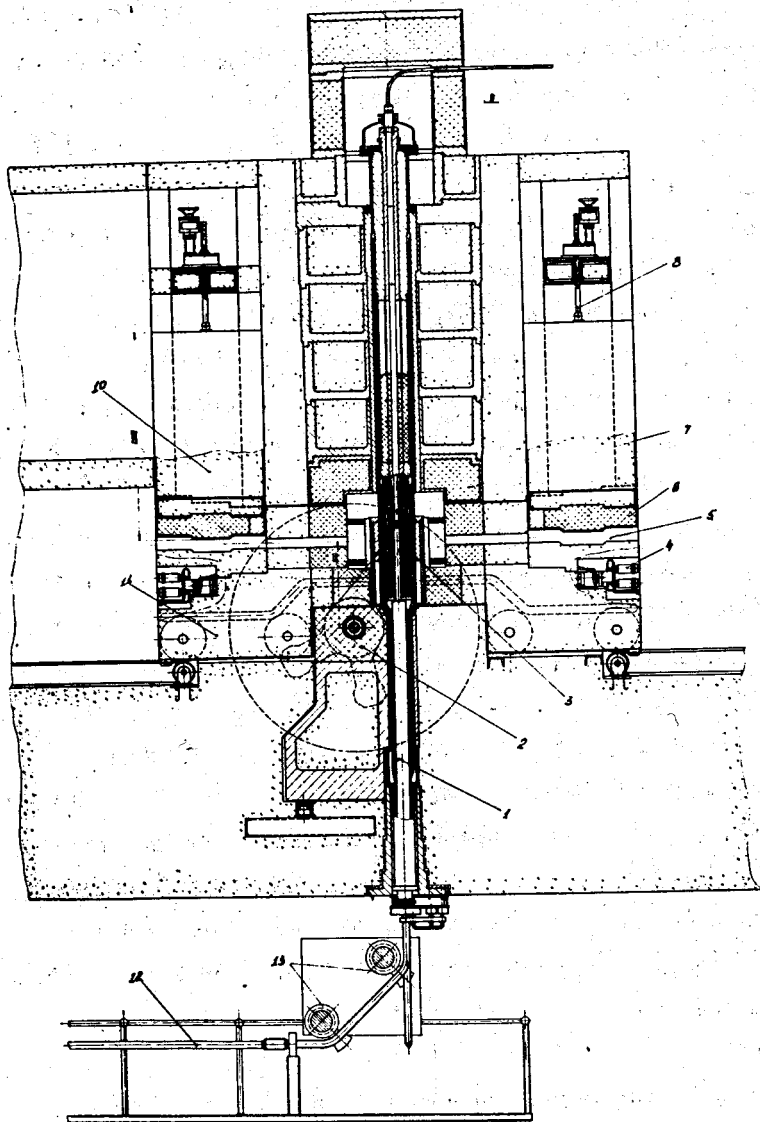


Рис.10. Вертикальный разрез реактора ИБР-2. 1 - канал мишени ускорителя; 2 - ротор подвижного отражателя; 3 - активная зона; 4 - гидропривод стержней быстрой аварийной защиты; 5 - экспериментальный канал для нейтронного пучка; 6 - шибер экспериментального канала; 7 - тепловая и радиационная защита; 8 - привод шибера; 9 - канал центральной пневмопочты; 10 - внутренняя бетонная биологическая защита; 11 - откатная защита с отражателями и замедлителями; 12 - электропровод; 13 - магниты поворота электронного пучка.

из соображений безопасности. Производительность одной петли будет достаточна для обеспечения работоспособности реактора при пониженной мощности. Циркуляция натрия в первом и втором контурах будет поддерживаться электромагнитными насосами. Температура натрия на входе в зону 300°C , на выходе - 400°C . Расход теплоносителя при средней мощности 4 Мвт \approx 120 т/час.

В проекте системы охлаждения предусмотрены условия, обеспечивающие естественную циркуляцию натрия в случае выхода рециркуляционных насосов из строя.

Основные характеристики реактора приводятся в таблице 3. Дан-

Таблица 3
Характеристики реактора ИБР-2

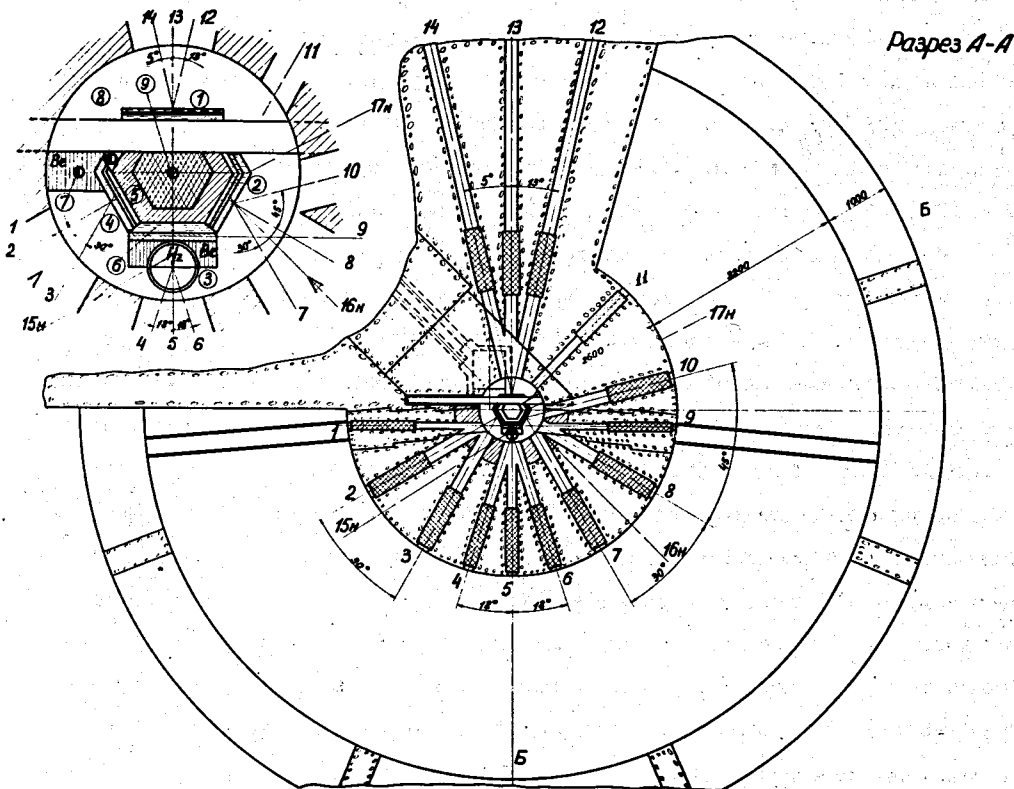
Средняя тепловая мощность	4 Мвт
Мощность в импульсе	
а) при частоте 5 сек ⁻¹	7700 Мвт
б) при частоте 50 сек ⁻¹	700 Мвт
Мощность, выделяемая между импульсами	0,22 Мвт
Мощность, выделяемая в побочных импульсах при частоте 5 сек ⁻¹	0,026 Мвт
Энергия импульса при частоте 5 сек ⁻¹	$2,5 \cdot 10^{16}$ делений
Утечка нейтронов из реактора в телесный угол 4π	$1,75 \cdot 10^{17} \frac{\text{н}}{\text{сек}}$
Полуширина импульса мощности при частоте 5 сек ⁻¹	90 мксек
Эффективное время жизни нейтронов	$4,2 \cdot 10^{-8}$ сек
Объем активной зоны	17,9 л
Кампания реактора при номинальной мощности до выгорания 5%	1000 суток

ные получены расчетным путем с применением программ метода Монте-Карло /31/; они подтверждаются результатами критической сборки реактора.

Экспериментальные устройства

Реактор располагается в центральной части биологической защиты, выполненной в виде двух концентрических колец (рис. 11). Пространство между кольцами защиты предназначено для размещения экспериментального оборудования. Оно служит также местом монтажа и демонтажа стационарных отражателей, водяных замедлителей, пневмопочт и т.п., устанавливаемых на откатных защитных тележках. Внешнее кольцо бетонной защиты на 270° охватывается экспериментальным валом с площадью 2600 м^2 .

В подреакторном помещении располагается конечная часть электроновода линейного ускорителя и отклоняющие магниты, разворачивающие пучок электронов на 90° (рис. 10). Замедлители устанавливаются в защитный шибер, который с помощью механизма транспортировки под углом 40° к горизонтали вводится во внутреннюю полость защиты так, что замедлитель располагается в непосредственной близости от отражателей реактора. Схема горизонтальных каналов для вывода нейтронных пучков и расположение замедлителей вокруг активной зоны реактора изображены на рис. 11. Замедлители 1,2,4 - водяные, каждый состоит из независимых секций, что позволяет изменять их толщину (35,45,55 мм) для обеспечения оптимальных условий выхода нейтронов в требуемом энергетическом диапазоне. Система контуров этих замедлителей позволяет осуществлять гомогенное "отравление" замедлителя и любой его секции независимо. Замедлитель 1, располагаемый за подвижным отражателем, предполагается использовать в основном как источник резонансных ней-



Разрез А-А

Рис.11. Схемы защиты и горизонтальных экспериментальных каналов реактора ИБР-2. 1 - замедлитель резонансных нейтронов; 2 - замедлитель тепловых нейтронов; 3 - источник холодных нейтронов; 4 - замедлитель тепловых нейтронов; 5 - стационарный отражатель; 6 - водяной замедлитель; 7 - пневмопочта на тепловые нейтроны; 8 - пневмопочта на быстрые нейтроны - в центре активной зоны; номера даны в кружках.

тронов. Он просматривается тремя горизонтальными каналами диаметром 200 мм, имеющими базы 1000 и 500 метров. Замедлители 2 и 4 будут служить источниками тепловых и надтепловых нейтронов. Они просматриваются шестью горизонтальными каналами диаметром 200 мм и 2-мя наклонными диаметром 150 мм. Каналы 1 и 9 представляют вместе сквозной тангенциальный канал, который может использоваться, например, для работ на "нейтронном газе" (изучение параметров (n, n) - рассеяния). Оба этих канала монтируются в защитных откатных вставках, что позволяет при необходимости ориентировать их на замедлители 4 и 2. Для генерации нейтронов, обогащенных холодными нейтронами ($\lambda > 4 \text{ \AA}$), за водяным замедлителем 6 размещается жидководородный замедлитель с объемом жидкого водорода в камере 1000 см^3 . Для его охлаждения используется газообразный гелий с входной температурой $11,5^\circ\text{K}$. Максимальная температура водорода в камере составляет $23-24^\circ\text{K}$; его кипение устраняется за счет поддерживания в камере замедлителя давления около 4 атм. Ожидается, что средняя температура нейтронов, покидающих замедлитель, составит 50°K . Холодный замедлитель просматривается горизонтальными каналами (4,5,6) диаметром 150 мм. Для увеличения выхода надтепловых нейтронов обсуждается возможность установки на реакторе горячего замедлителя. В качестве материала для горячего замедлителя предполагается использовать BeO при температуре $1800-2000^\circ\text{C}$, разогрев которого будет осуществляться за счет поглощения ядерных излучений реактора.

Предусматривается установка трех пневмопочт. Ожидаемые интенсивности нейтронных потоков приводятся в таблице 4.

Таблица 4

Характеристики нейтронных пучков на ИБР-2

1. Поток тепловых нейтронов:

а) с поверхности замедлителя 6 (средний по времени)	$5,8 \cdot 10^{12} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
б) с поверхности замедлителей 2 и 4 (средний по времени)	$3,5 \cdot 10^{12} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
в) в канале пневмопочты 7 (средний по времени)	$8 \cdot 10^{13} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
г) с поверхности замедлителя 6 в максимуме импульса при частоте 5 1/сек	$10^{16} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
д) в сквозном тангенциальном канале в максимуме импульса	$9 \cdot 10^{16} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$

2. Полуширина импульса тепловых нейтронов:

а) в замедлителях 2,4,6	120 мксек
б) в канале пневмопочты и в "холодном" замедлителе	200 мксек

3. Поток нейтронов в интервале энергий

0,46 эв + 1 эв с поверхности замедлителя 1	$0,4 \cdot 10^{12} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
--	---

4. Поток нейтронов с $\lambda = 5\text{А}$ с поверхности
"холодного" замедлителя в максимуме импульса
нейтронов

$$4,2 \cdot 10^{14} \frac{\text{н}}{\text{А} \cdot \text{см}^2 \text{сек}}$$

5. Поток быстрых нейтронов с энергией от 0,4 кэв
до 10 Мэв в центральном канале пневмопочты,
средний по времени

$$3 \cdot 10^{14} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$$

ЛИУ-30 - инжектор для ИБР-2

В качестве инжектора выбран электронный ускоритель, так как по сравнению с ускорителями тяжелых частиц он может быть сделан существенно проще и надежнее в работе.

Принцип действия ЛИУ и его конструктивная схема максимально просты /32,34/. ЛИУ представляет собой ряд импульсных трансформаторов (тороидальных индукторов), для которых электронный пучок, ускоренный вдоль оси индуктора, является вторичной обмоткой. Показано, что стоимость ЛИУ существенно снижается, а КПД увеличивается при снижении диаметра индукторов /33/. Поэтому наружный диаметр индукторов ЛИУ-30 по пермаллою выбран 260 мм. Ожидается, что средняя мощность пучка ЛИУ-30 составит при этом 15% общей мощности электропитания ускорителя.

Параметры ЛИУ приведены в таблице 5. Узлы, из которых состоит ЛИУ-30, имеют следующие характеристики. Электронная пушка рассчитана на импульсное напряжение 300-500 кВ и ток эмиссии с катода 300 а. Индукторы, в каждом из которых прирост энергии электронов составляет 23-25 кэВ, будут изготовлены из 50% железо-никелевого пермаллоя. Индукторы охлаждаются дистиллированной водой. Перемагничивающие импульсы получаются от импульсных модуляторов с ионными ком-

Таблица 5
Параметры ЛИУ-30

Энергия электронов	30 МэВ
Ток в импульсе	250 а
Длительность импульса	0,5 мксек
Частота повторений	50 сек ⁻¹
Наружный диаметр индуктора	260 мм
Длина ускорителя	160 м
Мощность электропитания установки (средняя)	1,35 Мвт
Мощность электронного пучка (средняя)	0,2 Мвт
Число нейтронов в импульсе на толстой неразмножающей урановой мишени	$1,2 \cdot 10^{13}$ импульс ⁻¹

мутаторами. В качестве накопителей энергии используются искусственные неоднородные длинные линии с емкостной реакцией и с изменяющимся от ячейки к ячейке по определенному закону волновым сопротивлением. Ионными коммутаторами служат мощные тиратроны. Один модулятор питает одновременно несколько индукторов. Заряд накопительной линии осуществляется от источника постоянного тока через зарядный дроссель, который обеспечивает так называемый резонансный режим заряда. В этом случае напряжение на линии превышает напряжение источника питания.

Ввиду большой длины ускорителя вводится временная программа подачи ускоряющих импульсов на индукторы, согласованная с прохождением электронов через индукторы. Фокусировка и коррекция отклонений оси пучка от оси индукторов выполняется короткими соленоидами, устанавливаемыми в разрывах между индукторными секциями и системой токовых витков. Отдельные фокусирующие и корректирующие элементы питаются независимо. Из-за большой длины ускорителя магнитное поле Земли в разрывах между индукторными секциями будет отклонять траектории электронов от оси ускорителя. Это влияние компенсируется упомянутой выше системой токовых витков.

Контроль за пучком ускоренных электронов будет осуществляться датчиками, измеряющими полный ток электронов, его пространственное распределение и положение пучка относительно оси ускорителя.

Средняя мощность бустера ИБР-2 с ЛИУ-30 дается на рис. 12 в виде зависимости от полуширины импульса.

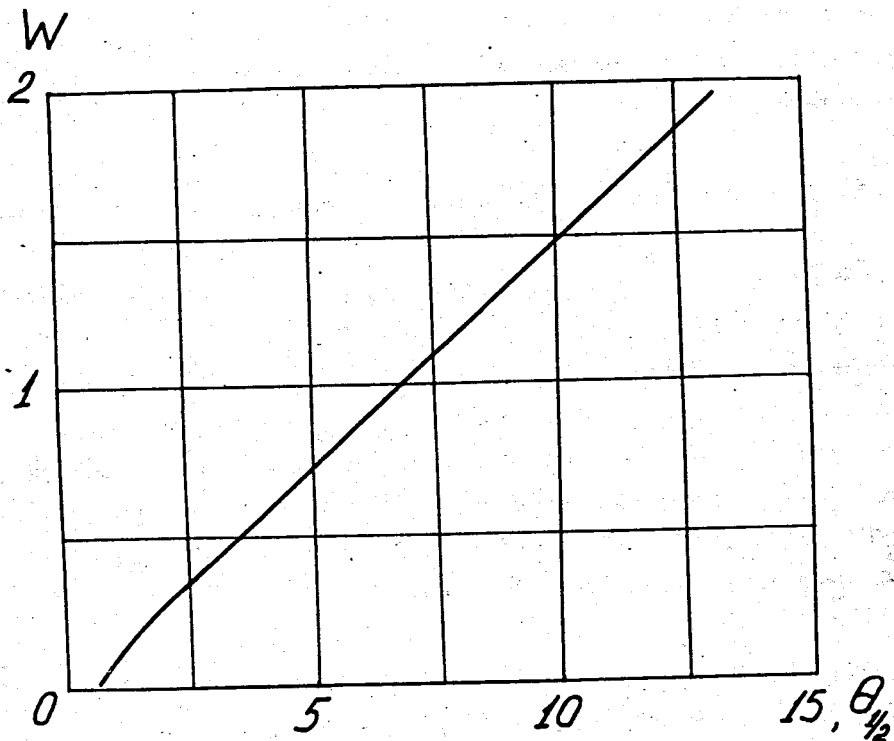


Рис.12. Зависимость средней мощности реактора ИБР-2 от полуширины импульса для бустерного режима; полуширина импульса θ приведена в мксек, мощность W - в мегаваттах.

Л и т е р а т у р а

1. И.И. Бондаренко, Ю.Я. Стависский. АЭ, т.7, вып. 5, 417 (1959).
2. Г.Е. Блохин и др. АЭ, т.10, вып. 5, 438 (1961).
3. Г.Е. Блохин и др. Physics of Fast and Intermediate Reactors, р.399-417, IAEA, Vienna (1962).
4. И.М. Франк. Препринт Р-674, Дубна 1961 .
5. В.Д. Денисов, Ж.А. Козлов, Люй Минь, В.М. Назаров, Г.Н. Погодаев, Е.П. Шабалин, Ю.С. Язвический. Препринт ОИЯИ Р-1257, Дубна, 1963. Представлен на Международное совещание по физике и технике реакторов в Праге, апрель 1963.
6. Люй Минь, Е.П. Шабалин, Ю.С. Язвический. АЭ, т.16, вып. 1 (1964).
7. Б.Н. Бунин, И.М. Матора, С.К. Николаев, Л.Б. Пикельнер, И.М. Франк, Е.П. Шабалин, Ф.Л. Шапиро, Ю.С. Язвический. Материалы III Международной конференции по использованию атомной энергии в мирных целях. 28/р-324, Женева, 1964.
8. В.Д. Ананьев, И.М. Матора, Г.Н. Погодаев, В.Т. Руденко, Е.П. Шабалин, Ф.Л. Шапиро, И.М. Франк. Препринт ОИЯИ 2372, Дубна 1965 .
9. Randles, J. and Jaarsma, R. "Some Problems of Stress Wave Production encountered in the Study of Pulsed Fast Reactor Dynamics" EUR 3654e, 1967.
10. В.Д. Ананьев, П.С. Анцупов, С.П. Капица, И.М. Матора, В.Н. Мелехин, Л.А. Меркулов, Р.В. Харьюзов. АЭ, т.20, вып. 2, 106 (1966).
11. В.Д. Ананьев, П.С. Анцупов, И.М. Матора, Л.А. Меркулов, Р.В. Харьюзов. Препринт ОИЯИ 9-3283, Дубна 1967.
12. Л.Б. Пикельнер, В.Т. Руденко. Proceedings of Panel, Dubna 18-22 July 1966. PL-203/11.
13. Ю.А. Александров, Г.С. Самосват, Ж. Сэрээтэр, Цой Ген Сор. ЖЭТФ, Письма в редакцию т. IV , вып. 5, 196 (1966).

14. Ю.А. Александров, А.М. Балагуров, Э. Малишевски, Т.А. Мачехина, Л.Н. Седлакова, Я. Холас. Препринт ОИЯИ РЗ-4121, Дубна 1968.
15. В.И. Лушиков, Ю.Н. Покотилловский, А.В. Стрелков, Ф.Л. Шапиро. Препринт ОИЯИ РЗ-4127, Дубна, 1968.
16. P.Draghicescu, V.I. Lushchikov, V.G.Nikolenko, Yu.V. Taran and F.L.Shapiro. Physics Letters, v.12, 334 (1964).
17. V.P.Alfimenkov, V.I. Lushchikov, V.G.Nikolenko, Yu.V.Taran and F.Z.Shapiro. Physics Letters v.24B , n.3, 151 (1967).
18. В.П. Алфименков, В.И. Лушиков, В.Г. Николенко, Ю.В. Таран, Ф.Л. Ф.Л. Шапиро. Ядерная физика, т.3, вып. 1, 55 (1966).
19. I.Kvitek and Yu.P.Popov. Physics Letters v.22, n.2, 186 (1966).
20. Ю.П. Попов, М. Стэмпинский. ЖЭТФ, Письма в редакцию, т.7, вып.4, 126 (1968).
21. Ю.В. Рябов, Ван Юн-чан, Е. Дерменджиев, Чжан Пэ-шу. Препринт ОИЯИ Р-2713, Дубна 1966.
22. И.И. Бондаренко, В.Г. Лифоров, В.Н. Морозов, М.Н. Николаев, В.А. Парфенов, В.А. Семенов. Атомная энергия, т. 18, вып.6, 593 (1965).
23. Ю.В. Рябов, Со Дон Сик, Н. Чиков, Н. Янева. Атомная энергия, т. 24, вып. 4, 351 (1968).
24. И. Сосновска, Е. Сосновски, С.В. Киселев, А.Н. Кшнякина, Р.П. Озеров. Препринт ОИЯИ 2653, Дубна 1966.
25. В.В. Голиков, И. Жуковская, Ф.Л. Шапиро, А. Шкатула, Е. Яник. Препринт ОИЯИ Р-1903, Дубна 1964. Представлено на Международный симпозиум по неупругому рассеянию нейтронов в твердых телах и жидкостях. Бомбей, декабрь 1964.

26. В.В. Нитц, И. Сосновска, Е. Сосновски. Препринт ОИЯИ Р-1847, Дубна 1964. Представлено на Международный симпозиум по неупругому рассеянию нейтронов в твердых телах и жидкостях. Бомбей, декабрь 1964.
27. I.Natkaniec, K.Parlinski, J.A.Janik, A.Bajorek, M.Sudnik-Hrynkiwicz. Preprint of JINR, E14-3825. Dubna, 1968.
28. Л.А. Булавин, А.В. Воронель, Ю.М. Останевич, А.П. Симкина, А.В. Стрелков. Препринт ОИЯИ Р14-3824, Дубна 1968. Представлено на симпозиум по неупругому рассеянию нейтронов, Копенгаген, 20-25 мая 1968.
29. О.Д. Казачковский и др. "Атомная энергия" 24, 136 (1968).
30. А.И. Лейпунский и др. "Атомная энергия" 5, 345 (1964).
31. В.И. Кочкин, Е.П. Шабалин. Препринт ОИЯИ 11-4098, Дубна 1968.
32. N.S.Christofilos, R.E.Hester, W.A.S.Lamb, D.D.Reagun, W.A.Sherwood, R.E.Wright.
Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963. Атомиздат, 1964, с. 1073.
33. И.М. Матора. Препринт ОИЯИ Р9-3184, Дубна 1967.
34. А.И. Анацкий и др. "Атомная энергия" 21, 439 (1966).

Рукопись поступила в издательский отдел
3 апреля 1969 года.